全混合日粮物理有效中性洗涤纤维水平对泌乳中期奶牛瘤胃液和乳中脂肪酸组成的影响

王砀砀　赵会会　肖凯丽　姚军虎　曹阳春—

（西北农林科技大学动物科技学院，杨凌 712100）

摘 要：本文旨在研究不同全混合日粮（TMR）物理有效中性洗涤纤维（peNDF）水平对泌乳中期奶牛瘤胃液和乳中脂肪酸组成的影响。选用30头体重约650 kg、2胎次、产后（120±8）d、日均产奶量（33.03±1.59） kg、体况相近的健康荷斯坦奶牛为试验动物，采用单因素试验设计，随机分为3组，通过控制搅拌时间获得低（9.02%）、中（10.56%）、高（11.25%）3个peNDF水平的TMR，每种TMR饲喂1组奶牛，每组10头。TMR精粗比为60∶40。预试期21 d，正试期6 d。结果表明：1）随着peNDF水平的提高，瘤胃液中肉豆蔻酸（C14:0）、反9肉豆蔻烯酸（C14:1 *trans*9）、珍珠酸（C17:0）、顺6油酸（C18:1 *cis*6）含量降低，异棕榈酸（C16:0 *iso*）、反9棕榈烯酸（C16:1 *trans*9）含量上升，高peNDF组和低peNDF组差异显著（P<0.05）。2）随着peNDF水平的提高，乳中顺9肉豆蔻烯酸（C14:1 *cis*9）、顺10十五烯酸（C15:1 *cis*10）、顺10十七烯酸（C17:1 *cis*10）、顺11油酸（C18:1 *cis*11）、反9,12亚油酸（C18:2 *trans*9,12）含量降低，异肉豆蔻酸（C14:0 *iso*）、C16:0 *iso*含量上升，高peNDF组和低peNDF组差异显著（P<0.05）；随着peNDF水平的提高，乳中短链脂肪酸含量提高，肉豆蔻烯酸Δ9去饱和酶指数、油酸Δ9去饱和酶指数降低，高peNDF组和低peNDF组差异显著（P<0.05）。结果提示，在高精料条件下，泌乳中期奶牛饲喂低peNDF水平（9.02%）TMR可改善乳中脂肪酸组成。

关键词：物理有效中性洗涤纤维；瘤胃液；乳；脂肪酸组成；奶牛

中图分类号：S823

粗饲料是反刍动物饲粮中的重要组成成分，是保证反刍动物生理健康和生产性能的关键。研究表明，不仅饲粮中中性洗涤纤维（NDF）含量影响瘤胃健康，同时饲料的物理（如粒度）与化学特性在很大程度上也能够影响反刍动物咀嚼和瘤胃发酵[1]。因而，Mertens[2]提出的物理有效中性洗涤纤维（peNDF）概念得到越来越多的重视。Li 等[3]经过 Meta 分析得出，饲粮 1.18 mm 孔径筛上物 peNDF（$\text{peNDF}_{1.18}$）含量为 27.59%～35.26%，饲粮 8.00 mm 孔径筛上物 peNDF（$\text{peNDF}_{8.00}$）含量为 12.83%～18.80%时能够保证奶牛瘤胃健康、较高的

收稿日期：2018-01-04
基金项目：国家自然科学基金（31402102）；杨凌示范区产学研用协同创新重大项目（2016CXY-18）
作者简介：王砀砀（1990-），男，安徽宿州人，硕士研究生，从事反刍动物营养研究。E-mail：wangdang2015@126.com
—通信作者：曹阳春，副教授，硕士生导师，E-mail： caoyangchun@126.com

干物质采食量（DMI）、产奶量和泌乳率。目前，国内大多以高精料饲粮饲喂泌乳奶牛。而在实际生产中，由于全混合日粮（TMR）制作不规范、搅拌时间不统一，导致 TMR peNDF 水平也就有所变化，造成同一配方制成的 TMR 在实质上并不相同。研究表明，提高饲粮 peNDF 水平可提高泌乳奶牛的瘤胃液 pH、咀嚼活动和消化率，并影响乳蛋白和乳脂含量[4-5]。但是，对于 peNDF 的生理作用了解不充分导致迄今为止它没有成为评价饲粮纤维充足性的常规指标。

乳及乳制品已经成为人们日常生活中不可或缺的优质营养补充食品。然而乳中饱和脂肪酸（SFA）含量较高，不饱和脂肪酸（UFA）含量较低，而普遍认为摄入过多的 SFA 对人体健康有不利影响[6]。因此，如何提高乳中 UFA 含量，使其更加符合人体健康需求是乳业生产中的研究热点。Colman 等[7]研究表明，低 peNDF 诱导的亚急性瘤胃酸中毒提高了乳中奇数脂肪酸[十五烷酸（C15:0）、珍珠酸（C17:0）和顺 9 珍珠烯酸（C17:1 *cis*9）]及反 10 油酸（C18:1 *trans*10）的含量，并降低反 11 油酸（C18:1 *trans*11）和主要的支链脂肪酸含量。Wales 等[8]研究发现，放牧奶牛额外添加精料可显著增加乳中葵酸（C10:0）、月桂酸（C12:0）、肉豆蔻酸（C14:0）、n6 亚油酸（C18:2n-6）含量，显著降低乳中丁酸（C4:0）含量。本研究旨在研究 TMR peNDF 水平对泌乳中期奶牛瘤胃液和乳中脂肪酸组成的影响，为确定生产实践中泌乳中期奶牛适宜的 peNDF 需要量提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　TMR

将精料、苜蓿干草、全棉籽、全株玉米青贮按比例混合，精粗比为 60:40，TMR 组成及营养水平见表 1。通过控制 TMR 混合机搅拌时间（10、18、60 min）制成高（11.25%，H-peNDF 组）、中（10.56%，M-peNDF 组）、低（9.02%，L-peNDF 组）3 个 peNDF 水平的 TMR（表 2）。

表 1　TMR 组成及营养水平

Table 1　Composition and nutrient levels of the TMR　　%

项目 Items	含量 Content
原料(鲜重基础) Ingredients （fresh weight basis）	
苜蓿干草 Alfalfa hay	15.84
玉米青贮 Corn silage	18.48
蒸汽压片玉米 Steam flacked corn	11.22
玉米粉 Corn powder	11.22

豆粕 Soybean meal	4.75
棉籽粕 Cottonseed meal	2.11
玉米干酒糟及其可溶物 Corn DDGS	3.30
玉米纤维 Corn fiber	9.24
棉籽 Cottonseed	2.64
缓释非蛋白氮 Slow-release NPN[1)]	0.08
预混料 Premix[2)]	1.06
过瘤胃脂肪 Rumen-protected fat	0.26
水 Water	19.80
总计 Total	100.00
营养水平(干物质基础) Nutrient levels （DM basis）[3)]	
干物质 DM	60.00
粗蛋白质 CP	17.80
粗脂肪 EE	5.00
淀粉 Starch	25.30
中性洗涤纤维 NDF	27.40
酸性洗涤纤维 ADF	16.10
泌乳净能 NE_L/(MJ/kg)	7.07
精粗比 C:F	60:40

[1)] 购自奥特奇生物制品有限公司 Brought from Alltech biochemical regent Co., Ltd.

[2)]每千克预混料含 One kilogram of premix contained the following：Cu 350 mg，Fe 2 200 mg，Zn 1 800 mg，Mn 800 mg，I 130 mg，Se 30 mg，Co 50 mg，VB_1 40 mg，VB_{12} 1 mg，烟酸 nicotinic acid 1 000 mg，泛酸 pantothenic acid 700 mg，VK_3 45 mg，VA 200 000 IU，VD_3 4 500 IU，VE 6 500 IU。

[3)]泌乳净能为计算值，由 CPM-Dairy 3.8.0.1 软件计算得出，其他营养水平为实测值。NE_L was a calculated value, and was calculated by CPM-Dairy 3.8.0.1, while the other nutrient levels were measured values.

表 2　不同搅拌时间下 TMR 的 peNDF 水平（干物质基础）

Table 2　peNDF levels of TMR under different mixing time (DM basis)

项目 Items	搅拌时间 Mixing time/min			标准误 SEM	P 值 P-value
	10	18	60		
粒径分布 Particle distribution					
>19.00 mm	17.26[ab]	15.10[b]	9.15[c]	0.96	<0.05
>8.00~19.00 mm	22.80[a]	21.63[b]	23.16[a]	0.25	0.028
>1.18~8.00 mm	32.91[c]	36.47[b]	40.01[a]	0.82	<0.05
≤1.18 mm	27.11	26.26	27.68	0.80	0.334
$pef_{8.00}$	40.17[a]	37.68[b]	32.21[c]	0.92	<0.05
8.00 mm 孔径筛上物物理有效中性洗涤纤维 $peNDF_{8.00}$	11.25[a]	10.56[b]	9.02[c]	0.24	<0.05

同行数据无字母或相同字母肩标表示差异不显著（P>0.05），不同小写字母肩标表示差异显著（P<0.05）。下表同。

In the same row, values with no letter or the same letter superscripts means no significant difference (P>0.05), while with different small letter superscripts mean significant difference (P<0.05). The same as below.

1.2 试验动物与试验设计

选取 30 头、2 胎次、体重约 650 kg、产后（120±8） d、日均产奶量（33.03±1.59） kg、体况相近的健康荷斯坦奶牛为试验对象。采用单因素试验设计，将 30 头奶牛随机分为 3 组，分别饲喂高、中、低 peNDF 水平的 TMR，每组 10 头。预试期 21 d，正试期 6 d。每日饲喂 2 次（08:00 及 15:00）保证食槽中有至少 5%的剩料，每日挤奶 3 次（00:00——01:00、07:00—08:00 及 14:00—15:00），单栏栓系饲养，自由饮水。

1.3 样品采集

1.3.1 TMR 样品的采集

于正试期第 1~3 天连续 3 d 采集 TMR 样品，65 ℃烘干，经 40 目筛粉碎后，置于-20 ℃保存中待测。

1.3.2 瘤胃液样品的采集

于正试期第 1~3 天连续 3 d 采集瘤胃液。采用瘤胃穿刺法[9]采集试验组每头泌乳中期奶牛的瘤胃液 200 mL，将采集好的瘤胃液进行冷冻干燥，并将干燥样品置于 4 ℃中保存。

1.3.3 奶样的采集

于正试期的第 4~6 天连续 3 d 采集试验动物奶样。每天挤奶时采集 50 mL 奶样，将 3 个时段采集的奶样按 3:3:4 混匀后进行冷冻干燥处理，将干燥样品置于 4 ℃中保存。

1.4 测定指标及方法

1.4.1 TMR 的 peNDF 水平

TMR 的 peNDF 水平采用 Heinrichs 等[10]制作的宾夕法尼亚筛（PSPS）测定，PSPS 共分为 4 层（上面 3 层筛网的孔径分别为 19.00、8.00 和 1.18 mm，最下面为筛底）。测定方法参照 White 等[11]进行，具体如下：将 PSPS 按照孔径大小依次向下排列，取 200 g TMR 样品置于最上层筛。PSPS 共进行水平振荡 40 次（每个方向 5 次，共进行 2 组），振荡频率为 1 次/s 或水平振荡距离大于 17 cm，振荡过程中不允许出现垂直振动。振荡结束后，称量每层筛上样品 DM 含量。$pef_{8.00}$ 为 2 层筛上物[>8.00 mm]的 DM 占 TMR 的 DM 的比例。

$$peNDF_{8.00}（\%）=pef_{8.00}\times NDF 含量。$$

1.4.2　TMR 营养水平

采用常规法测定 TMR 样品的干物质（DM）、粗蛋白质（CP）、粗脂肪（EE）、淀粉、NDF 和酸性洗涤纤维（ADF）含量[12-13]。

1.4.3　瘤胃液和乳中脂肪酸含量

参照 Sun 等[14]方法对瘤胃液样品和乳样进行脂肪酸含量测定的前处理，采用 Agilent 7820A 气相色谱仪测定。色谱条件为：毛细柱 Supelco SP-2560；毛细管 100 m×0.25 mm，0.20 μm，检测器为火焰氢离子检测器（FID）。最高使用温度为 250 ℃，载气为氮气，流速为 20 cm/s；柱箱温度 140 ℃保持 5 min，然后 4 ℃/min 的速率升高至 240 ℃。进样方式为分流进样，分流比为 50∶1，进样量为 1 μL，以十九烷酸（C19:0）为内标，ME93、BR2、BR3、37 种混标为外标。

1.5　数据统计分析

数据基本处理用 Excel 2010 软件进行，采用 SPSS 20.0 统计软件中的 ANOVA 进行单因素方差分析(one-way ANOVA)，LSD 法多重比较，以 $P<0.05$ 作为显著性判断依据。

2 结　果

2.1　TMR 的 peNDF 水平对瘤胃液脂肪酸组成的影响

由表 3 可知，随 peNDF 水平的提高，瘤胃液中 C14:0、反 9 肉豆蔻烯酸（C14:1 *trans*9）、C17:0、顺 6 油酸（C18:1 *cis*6）含量降低，异棕榈酸（C16:0 *iso*）、反 9 棕榈烯酸（C16:1 *trans*9）含量上升，H-peNDF 组和 L-peNDF 组差异显著（$P<0.05$），其余脂肪酸含量差异不显著（$P>0.05$）。

表 3　TMR 的 peNDF 水平对瘤胃液脂肪酸含量的影响

Table 3　Effects of peNDF level of TMR on FA contents in rumen fluid　　%

项目 Items	组别 Groups			标准误 SEM	*P* 值 *P*-value
	H-peNDF	M-peNDF	L-peNDF		
月桂酸 C12:0	1.428	1.769	1.869	0.110	0.243
异十三烷酸 C13:0 *iso*	0.237	0.237	0.223	0.017	0.930
十三烷酸 C13:0	0.470	0.571	0.616	0.036	0.258
异肉豆蔻酸 C14:0 *iso*	0.908	0.950	0.824	0.042	0.487
肉豆蔻酸 C14:0	4.502^b	6.765^a	7.360^a	0.434	0.011
反异十五烷酸 C15:0 *anteiso*	2.554	2.409	2.689	0.086	0.452
反 9 肉豆蔻烯酸 C14:1 *trans*9	0.280^b	0.304^b	0.430^a	0.025	0.021
异十五烷酸 C15:0 *iso*	6.877	6.912	7.332	0.283	0.787
十五烷酸 C15:0	3.437	3.658	3.696	0.124	0.682
异肉豆蔻酸 C14:0 *iso*	0.370	0.224	0.291	0.032	0.200

异棕榈酸 C16:0 *iso*	1.165[a]	0.805[ab]	0.672[b]	0.084	0.036
顺 10 十五烯酸 C15:1 *cis*10	0.600	0.817	0.728	0.045	0.143
棕榈酸 C16:0	34.197	32.623	31.786	0.449	0.063
反 9 棕榈烯酸 C16:1 *trans*9	0.435[a]	0.326[b]	0.320[b]	0.022	0.039
顺 9 棕榈烯酸 C16:1 *cis*9	1.223	1.131	1.236	0.039	0.532
异珍珠酸 C17:0 *iso*	0.118	0.116	0.119	0.007	0.984
珍珠酸 C17:0	0.739[b]	0.814[ab]	0.942[a]	0.034	0.034
异硬脂酸 C18:0 *iso*	0.034	0.036	0.032	0.002	0.578
顺 10 十七烯酸 C17:1 *cis*10	0.194	0.191	0.173	0.008	0.495
硬脂酸 C18:0	8.600	7.537	6.071	0.495	0.120
反 9 油酸 C18:1 *trans*9	1.467	1.290	1.436	0.056	0.415
反 11 油酸 C18:1 *trans*11	0.225	0.214	0.209	0.011	0.849
顺 9 油酸 C18:1 *cis*9	9.828	9.559	10.407	0.419	0.725
顺 6 油酸 C18:1 *cis*6	3.147[b]	4.605[a]	5.010[a]	0.314	0.034
顺 11 油酸 C18:1 *cis*11	0.813	0.854	0.822	0.022	0.745
反 9,12 亚油酸 C18:2 *trans*9,12	0.037	0.047	0.047	0.002	0.117
顺 9,12 亚油酸 C18:2 *cis*9,12	14.510	14.232	11.727	0.801	0.341
花生酸 C20:0	0.255	0.224	0.220	0.011	0.418
饱和脂肪酸 SFA	73.121	75.488	76.420	0.986	0.395
不饱和脂肪酸 UFA	26.879	24.512	23.580	0.986	0.395
饱和脂肪酸/不饱和脂肪酸 SFA/UFA	2.848	3.127	3.284	1.291	0.400
长链脂肪酸 LCFA	40.489	39.719	39.519	0.918	0.912
肉豆蔻烯酸Δ9 去饱和酶指数 C14:1 Δ9-desaturase index	0.074	0.077	0.083	0.577	0.211
油酸Δ9 去饱和酶指数 C18:1 Δ9-desaturase index	0.653	0.688	0.718	1.192	0.302

肉豆蔻烯酸Δ9 去饱和酶指数=肉豆蔻烯酸/（肉豆蔻酸+肉豆蔻烯酸）；油酸Δ9 去饱和酶指数=油酸/（硬脂酸+油酸）。下表同。

C14:1 Δ9-desaturase index=C14:1/(C14:0+C14:1); C18:1 Δ9-desaturase index=C18:1/(C18:0+C18:1). The same as below.

2.2 TMR 的 peNDF 水平对乳中脂肪酸组成的影响

由表 4 可知，随 peNDF 水平的提高，乳中顺 9 肉豆蔻烯酸（C14:1 *cis*9）、顺 10 十五烯酸（C15:1 *cis*10）、顺 10 十七烯酸（C17:1 *cis*10）、顺 11 油酸（C18:1 *cis*11）、反 9,12 亚油酸（C18:2 *trans*9,12）含量降低，异肉豆蔻酸（C14:0 *iso*）、C16:0 *iso* 含量显著上升，H-peNDF 组和 L-peNDF 组差异显著（$P<0.05$）。乳中短链脂肪酸（SCFA）含量随着 peNDF 水平的提高而提高，肉豆蔻烯酸Δ9 去饱和酶指数、油酸Δ9 去饱和酶指数随着 peNDF 水平的降低而提高，H-peNDF 组和 L-peNDF 组差异显著（$P<0.05$）。

表 4 TMR 的 peNDF 水平对乳中脂肪酸含量的影响

Table 4 Effects of peNDF level of TMR on FA contents in milk %

项目 Items	组别 Groups			标准误 SEM	*P* 值 *P*-value
	H-peNDF	M-peNDF	L-peNDF		
丁酸 C4:0	0.940	0.966	0.900	0.022	0.497
己酸 C6:0	1.323	1.317	1.219	0.023	0.109
辛酸 C8:0	1.209	1.178	1.143	0.020	0.450
葵酸 C10:0	3.381	3.172	3.096	0.088	0.409
十一烷酸 C11:0	0.342	0.394	0.368	0.014	0.324
月桂酸 C12:0	4.000	3.858	3.953	0.155	0.884
异十三烷酸 C13:0 *iso*	0.082	0.075	0.087	0.002	0.111
十三烷酸 C13:0	0.136	0.179	0.149	0.009	0.138
异肉豆蔻酸 C14:0 *iso*	0.115[a]	0.082[b]	0.075[b]	0.005	0.001
肉豆蔻酸 C14:0	10.950	10.986	10.932	0.164	0.991
反异十五烷酸 C15:0 *anteiso*	0.225	0.195	0.207	0.005	0.055
反 9 肉豆蔻烯酸 C14:1 *trans*9	0.010	0.011	0.012	0.001	0.316
异十五烷酸 C15:0 *iso*	0.504	0.436	0.445	0.013	0.060
顺 9 肉豆蔻烯酸 C14:1 *cis*9	0.712[b]	0.769[b]	0.909[a]	0.030	0.018
十五烷酸 C15:0	1.326	1.519	1.453	0.049	0.271
异棕榈酸 C16:0 *iso*	0.236[a]	0.221[ab]	0.174[b]	0.010	0.030
顺 10 十五烯酸 C15:1 *cis*10	0.014[b]	0.016[b]	0.020[a]	0.001	0.021
棕榈酸 C16:0	31.481	31.748	31.583	0.411	0.968
反 9 棕榈烯酸烯酸 C16:1 *trans*9	0.416	0.396	0.424	0.008	0.315
异珍珠酸 C17:0 *iso*	0.294	0.262	0.258	0.010	0.308
顺 9 棕榈烯酸 C16:1 *cis*9	1.496	1.371	1.711	0.070	0.140
珍珠酸 C17:0	0.766	0.786	0.813	0.012	0.284
异硬脂酸 C18:0 *iso*	0.049	0.045	0.048	0.002	0.820
顺 10 十七烯酸 C17:1 *cis*10	0.198[b]	0.182[b]	0.234[a]	0.008	0.021
硬脂酸 C18:0	11.697	11.758	10.574	0.283	0.155
反 9 油酸 C18:1 *trans*9	0.391	0.423	0.486	0.019	0.109
反 11 油酸 C18:1 *trans*11	1.516	1.746	1.907	0.090	0.207
顺 6 油酸 C18:1 *cis*6	0.368	0.348	0.507	0.036	0.145
顺 9 油酸 C18:1 *cis*9	20.261	20.478	21.074	0.408	0.710
顺 11 油酸 C18:1 *cis*11	0.703[b]	0.723[b]	0.871[a]	0.026	0.013
反 9,12 亚油酸 C18:2 *trans*9,12	0.200[b]	0.213[b]	0.304[a]	0.018	0.031
顺 9,12 亚油酸 C18:2 *cis*9,12	2.942	2.898	2.693	0.074	0.351
花生酸 C20:0	0.180	0.182	0.166	0.004	0.161
顺 6,9,12 亚麻酸 C18:3 *cis*6,9,12	0.039	0.039	0.034	0.002	0.670
反 11 花生烯酸 C20:1 *trans*11	0.009	0.012	0.026	0.004	0.164
顺 11 花生烯酸 C20:1 *cis*11	0.121	0.123	0.117	0.005	0.898
顺 9,12,15 亚麻酸 C18:3 *cis*9,12,15	0.299	0.307	0.276	0.008	0.236
二十一烷酸 C21:0	0.031	0.032	0.029	0.001	0.717
顺 11,14 花生二烯酸 C20:2 *cis*11,14	0.044	0.042	0.045	0.001	0.696
二十二碳烷酸 C22:0	0.058	0.060	0.052	0.001	0.147
顺 11,14 花生三烯酸 C20:3 *cis*11,14	0.182	0.166	0.168	0.006	0.558
反 13 二十二碳烯酸 C22:1 *trans*13	0.005	0.004	0.004	0.001	0.574
顺 11,14,17 花生三烯酸 C20:3 *cis*11,14,17	0.228	0.206	0.192	0.007	0.144
饱和脂肪酸 SFA	70.384	69.935	69.015	0.481	0.513
不饱和脂肪酸 UFA	29.616	30.065	30.985	0.481	0.513
饱和脂肪酸/不饱和脂肪酸 SFA/UFA	2.381	2.352	2.259	1.961	0.613

支链和奇数碳原子脂肪酸 OBCFA	4.321	4.474	4.562	0.085	0.521
短链脂肪酸 SCFA	3.498^{a}	3.496^{a}	3.158^{b}	0.047	0.047
中链脂肪酸 MCFA	55.834	55.460	55.886	0.451	0.945
长链脂肪酸 LCFA	40.669	41.044	40.956	0.559	0.964
共轭亚油酸 CLA	3.100	3.110	3.000	0.083	0.831
肉豆蔻烯酸Δ9 去饱和酶指数 C14:1 Δ9-desaturase index	0.060^{b}	0.067^{b}	0.083^{a}	0.346	0.013
油酸 Δ9 去饱和酶指数 C18:1 Δ9-desaturase index	0.661^{b}	0.668^{b}	0.707^{a}	0.691	0.007

3 讨 论

研究表明，纤维素作为反刍动物的一种必需营养素，它能够为反刍动物提供大量的能源，维持瘤胃正常功能、动物健康和生产性能。但以 NDF 作为评判纤维的指标来指导奶牛 TMR 配制，结果却并不理想。这主要是由于 TMR 加工不当（未考虑 TMR 物理有效性）可能会导致奶牛的代谢疾病或者低生产效率。但 peNDF 水平并不是越高越好，Beauchmin 等[15]认为，当 TMR 的 peNDF 水平过低或者 TMR 粉碎过细时，颗粒大小对动物的咀嚼时间、瘤胃液 pH 和纤维消化率有显著的影响。李飞[16]研究发现，当 TMR 的 $peNDF_{8.00}$ 水平高于 18.8% 时，奶牛干物质采食量迅速下降。因此，研究在保证奶牛较高干物质采食量、乳脂率和瘤胃健康的前提下适宜的 peNDF 推荐水平非常必要。研究发现，降低粗饲料长度或粗饲料比例可显著降低 TMR 的 peNDF 水平，从而导致反刍时间及唾液分泌量减少，引起瘤胃液 pH 下降[17-18]。本研究在前人基础上进一步探究 TMR 的 peNDF 水平对脂肪酸组成的影响，在保证奶牛健康的前提下，适当拓宽 TMR 的 peNDF 水平，发现不同 peNDF 水平可影响瘤胃液和乳中脂肪酸组成。

瘤胃是反刍动物脂类消化代谢的主要场所，包括脂解、不饱脂肪酸的氢化和微生物脂肪的合成。所以，饲粮脂肪酸的组成、瘤胃微生物的种类以及其所分泌的与脂解和氢化有关的酶的活性对瘤胃脂肪酸组成都有着影响，同时瘤胃脂肪酸组成也可以反映饲粮脂肪酸组成和瘤胃微生物对饲粮多不饱和脂肪酸的代谢结果[15,19]。本试验中，瘤胃液中 SFA 含量随着 TMR 的 peNDF 水平升高而降低，但变化不显著，部分 SFA 含量变化规律与其一致，随着 peNDF 水平的升高而降低，如 C14:0 与 C17:0。而 UFA 含量变化规律不统一，C14:1 *trans*9、C18:1 *cis*6 随着 TMR 的 peNDF 水平升高而显著降低，C16:1 *trans*9 随着 TMR 的 peNDF 水平的升高而升高。本课题组前期研究表明，高、中、低 peNDF 组的泌乳中期奶牛瘤胃液 pH 分别为 6.04、5.75、5.66，且瘤胃液 pH 随着 peNDF 水平的降低而降低[20]。Ribeiro 等[21]研究表明，较低的瘤胃液 pH 会抑制瘤胃内脂肪的水解以及 UFA 的氢化速率。Troegeler-Meynadier

等[22]指出，瘤胃液 pH <6.0 时 C18:2n-6 的消失速率要低于瘤胃液 pH >6.5 时，并指出当瘤胃液 pH 为中性时更有利于 C18:2n-6 的氢化。体外研究表明，瘤胃真菌产生共轭亚油酸（CLA）的最佳 pH 为 7.0，该条件下 CLA 的产量高于 pH 为 6.5 和 6.0 时的产量[7]。也有研究表明，在瘤胃液 pH 为 6.0 时，C18:2n-6 氢化为 C18:1 *trans*11 的过程用时 72 h，而在 pH 为 6.5 和 7.0 时氢化所用的时间分别是 24 和 48 h[23]。已有研究表明，脂肪酸的来源、不饱和程度、酯化程度、构象、长度及组成会影响脂肪酸氢化程度，并且脂肪酸的氢化受多种微生物的影响[24]。在本试验条件下，TMR 的 peNDF 水平不同导致瘤胃液 pH 的变化，进而影响脂肪酸的氢化程度、路径和脂肪酸脂解。另外瘤胃液 pH 的变化可能会改变瘤胃微生物区系，直接影响瘤胃脂肪酸的代谢，或通过影响微生物产生的脂肪酸氢化相关酶的活性。但目前有关 peNDF 水平对瘤胃微生物的作用机制的研究较少，相关证据仍待补充。

本研究发现，乳中 SCFA 含量及油酸Δ9 去饱和酶指数、肉豆蔻烯酸Δ9 去饱和酶指数随 TMR 的 peNDF 水平的提高而显著提高，即泌乳中期奶牛采食低 peNDF 水平 TMR 能显著降低乳中 SCFA 含量以及 CLA 向 SFA 转化，这对人们食用是有益的；同时，增加了对人体有害的 SFA C14:0 向对人体有益的 UFA 肉豆蔻烯酸（C14:1）的转化。C18:1 *cis*11、C18:2 *trans*9,12 随着 TMR 的 peNDF 水平提高而降低，C16:0 *iso* 随着 TMR 的 peNDF 水平的提高而提高，与 Alzahal 等[15]发现的 C16:0 *iso* 含量变化不显著不一致，但本试验中 C18:1 *cis*11、C18:2 *trans*9,12 含量的变化与油酸Δ9 去饱和酶指数的变化是一致的。本研究发现，乳中 C14:0 *iso* 随着 TMR 的 peNDF 水平提高而升高，这与 Li 等[25]研究结果一致。TMR 的 peNDF 水平对乳腺Δ9 去饱和酶指数有显著影响，从而对相应的脂肪酸产生影响，至于不同 TMR 的 peNDF 水平通过何种途径影响去饱和酶的活性还有待进一步研究。

4 结 论

① 泌乳中期奶牛采食低 peNDF 水平的 TMR 提高了瘤胃液中 C14:0、C14:1 *trans*9、C17:0、C18:1 *cis*6 含量，降低了 C16:0 *iso*、C16:1 *trans*9 含量。

② 降低了乳中 SCFA 含量，提高 UFA C18:1 *cis*11、C18:2 *trans*9,12 含量，提高了肉豆蔻烯酸Δ9 去饱和酶指数和油酸Δ9 去饱和酶指数。

③ 高精料条件下，低 peNDF 水平能改善泌乳中期奶牛乳中脂肪酸组成。

参考文献：

[1] ZEBELI Q,ASCHENBACH J R,TAFAJ M,et al.Invited review:role of physically effective fiber and estimation of dietary fiber adequacy in high-producing dairy cattle[J].Journal of Dairy Science,2012,95(3):1041–1056.

[2] MERTENS D R.Creating a system for meeting the fiber requirements of dairy cows[J].Journal of Dairy Science,1997,80(7):1463–1481.

[3] 李飞，徐明，曹阳春，等.Meta 分析方法优化泌乳奶牛日粮碳水化合物平衡指数[J].畜牧兽医学报,2014,45(9):1457-1466.

[4] ZEBELI Q,MANSMANN D,STEINGASS H,et al.Balancing diets for physically effective fibre and ruminally degradable starch:a key to lower the risk of sub-acute rumen acidosis and improve productivity of dairy cattle[J].Livestock Science,2010,127(1):1–10.

[5] TAFAJ M,ZEBELI Q,BAES C,et al.A meta-analysis examining effects of particle size of total mixed rations on intake,rumen digestion and milk production in high-yielding dairy cows in early lactation[J].Animal Feed Science and Technology,2007,138(2):137–161.

[6] SIRI-TARINO P W,SUN Q,HU F B,et al.Meta-analysis of prospective cohort studies evaluating the association of saturated fat with cardiovascular disease[J].The American Journal of Clinical Nutrition,2010,91(3):535–546.

[7] COLMAN E,KHAFIPOUR E,VLAEMINCK B,et al.Grain-based versus alfalfa-based subacute ruminal acidosis induction experiments:similarities and differences between changes in milk fatty acids[J].Journal of Dairy Science,2013,96(7):4100–4111.

[8] WALES W J,KOLVER E S,EGAN A R,et al.Effects of strain of Holstein-Friesian and concentrate supplementation on the fatty acid composition of milk fat of dairy cows grazing pasture in early lactation[J].Journal of Dairy Science,2009,92(1):247–255.

[9] ENEMARK J M D.亚急性瘤胃酸中毒(SARA)的监测、预防与治疗[J].张养东,译.中国畜牧兽医,2010,37(3):44.

[10] HEINRICHS A J,KONONOFF P.Evaluating particle size of forages and TMRs using the new Penn state forage particle separator[R].Pennsylvania:The Pennsylvania State University,2002.

[11] WHITE R R,HALL M B,FIRKINS J L,et al.Physically adjusted neutral detergent fiber

system for lactating dairy cow rations. Ⅰ:deriving equations that identify factors that influence effectiveness of fiber[J].Journal of Dairy Science,2017,100(12):9551–9568.

[12] AOAC.Official methods of analysis[S].16th ed.Gaithersburg:Association of Official Analytical Chemists,1999.

[13] VAN SOEST P J,ROBERTSON J B,LEWIS B A.Methods for dietary fiber,neutral detergent fiber,and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition[J].Journal of Dairy Science,1991,74(10):3583–3597.

[14] SUN X Q,WANG Y P,CHEN B,et al.Partially replacing cornstarch in a high-concentrate diet with sucrose inhibited the ruminal *trans*-10 biohydrogenation pathway in vitro by changing populations of specific bacteria[J].Journal of Animal Science and Biotechnology,2016,7(2):176–183.

[15] ALZAHAL O,OR-RASHID M M,GREENWOOD S L,et al.The effect of dietary fiber level on milk fat concentration and fatty acid profile of cows fed diets containing low levels of polyunsaturated fatty acids[J].Journal of Dairy Science,2003,92(3):1108–1116.

[16] 李飞.奶山羊亚急性瘤胃酸中毒模型构建与奶牛日粮 CBI 的优化[D].博士学位论文.杨凌:西北农林科技大学,2014.

[17] ZHAO X H,ZHANG T,XU M,et al.Effects of physically effective fiber on chewing activity,ruminal fermentation,and digestibility in goats[J].Journal of Animal Science,2011,89(2):501–509.

[18] KHAFIPOUR E,KRAUSE D O,PLAIZIER J C.Alfalfa pellet-induced subacute ruminal acidosis in dairy cows increases bacterial endotoxin in the rumen without causing inflammation[J].Journal of Dairy Science,2009,92(4):1712–1724.

[19] 孙小琴.放牧奶牛乳脂肪酸组成及瘤胃脂肪酸代谢规律的研究[D].博士学位论文.杨凌:西北农林科技大学,2012.

[20] 曹志昂.日粮 peNDF 水平对泌乳牛咀嚼活动、瘤胃发酵及乳成分的影响[D].硕士学位论文.杨凌:西北农林科技大学,2015.

[21] RIBEIRO C V D M,EASTRIDGE M L,FIRKINS J L,et al.Kinetics of fatty acid

biohydrogenation *in vitro*[J].Journal of Dairy Science,2007,90(3):1405–1416.

[22] TROEGELER-MEYNADIER A,NICOT M C,BAYOURTHE C,et al.Effects of pH and concentrations of linoleic and linolenic acids on extent and intermediates of ruminal biohydrogenation *in vitro*[J].Journal of Dairy Science,2003,86(12):4054–4063.

[23] NAM I S,GARNSWORTHY P C.Factors influencing biohydrogenation and conjugated linoleic acid production by mixed rumen fungi[J].Journal of Microbiology,2007,45(3):199–204.

[24] ENJALBERT F,VIDEAU Y,NICOT M C,et al.Effects of induced subacute ruminal acidosis on milk fat content and milk fatty acid profile[J].Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition,2008,92(3):284–291.

[25] LI F,YANG X J,CAO Y C,et al.Effects of dietary effective fiber to rumen degradable starch ratios on the risk of sub-acute ruminal acidosis and rumen content fatty acids composition in dairy goat[J].Animal Feed Science and Technology,2014,189:54–62.

Effects of Physically Effective Neutral Detergent Fiber Level in Total Mixed Ration on Fatty Acid Composition in Rumen Fluid and Milk of Dairy Cows during Mid-Lactation Period

WANG Dangdang ZHAO Huihui XIAO Kaili YAO Junhu CAO Yangchun*

(*College of Animal science and Technology*, *Northwest A & F University, Yangling* 712100, *China*)

Abstract: This study was conducted to investigate the effects of physically effective neutral detergent fiber（peNDF）level in total mixed ration（TMR）on fatty acid composition in rumen fluid and milk of dairy cows during mid-lactation period. Based on a single factor experiment design, thirty healthy dairy cows with two parities, （120±8） days in milk, （33.03±1.59） kg of average daily milk yield and similar body condition were chosen as trial individuals and randomly divided into 3 groups with 10 cows per group. Three TMRs with different levels of peNDF were obtained by manipulating the mixing duration (H-peNDF: 11.25%, M-peNDF: 10.56%, L-peNDF: 9.02%), and each group was fed one of the three TMRs. The concentrate to forage ratio was 60∶40. The pretest period lasted for 21 days, and the test period lasted for 6 days.

*Corresponding author, professor, E-mail： caoyangchun@126.com (责任编辑 王智航)

The results showed as follows: 1) with the increase of peNDF level, C14:0, *trans*9 C14:0, C17:0 and *cis*6 C18:1 contents in rumen fluid were decreased, while *iso* C16:0 and *trans*9 C16:1 contents in rumen fluid were increased, and there were significant differences between H-peNDF group and L-peNDF group ($P<0.05$). 2) With the increase of peNDF level, *iso* C16:0 *cis*10 C17:1, *cis*11 C18:1 and *trans*9, 12 C18:2 contents in milk were decreased, while *iso* C14:0 and *iso* C16:0 contents in milk were increased, and there were significant differences between H-peNDF group and L-peNDF group ($P<0.05$). With the increase of peNDF level, short chain fatty acid content in milk were increased, C14:1 $\Delta9$-desaturase index and C18:1 $\Delta9$-desaturase index were decreased, and there were significant differences between H-peNDF group and L-peNDF group ($P<0.05$). The results indicate that TMR with low level of peNDF (9.02%) can improve milk fatty acid composition under high concentrate condition.

Key words: peNDF； rumen fluid； milk； fatty acid composition, dairy cow